

**В. Ф. ШИНКАРЕНКО, В. В. КОТЛЯРОВА, П. О. КРАСОВСЬКИЙ, Н. А. МІСАН**

## **ПРИНЦИПИ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ПРОСТОРОВО АДАПТИВНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ЗІ ЗМІННОЮ СТРУКТУРОЮ І ГЕОМЕТРІЄЮ АКТИВНОЇ ЗОНИ**

Аналізується характерна тенденція у розвитку сучасної техніки, яка пов'язана зі створенням складних просторових систем, наділених можливістю адаптувати просторову геометрію виконавчого органу у відповідність зі зміною факторів зовнішнього впливу. Визначено принципи генетичного структуроутворення просторово розподілених модульних електромеханічних систем з адаптивною геометрією активної зони. Визначено макрогенетичні програми генетично допустимих базових Видів електромеханічних структур зі змінною орієнтацією і геометрією активних частин. Показано домінуючу роль операторів реплікації, мутації і структурної ізомерії в задачах синтезу просторово адаптованих систем модульного типу. Вперше досліджено механізми міжродових мутацій, які визначають принципи структуроутворення об'єктів «еластичної електромеханіки», функціонування яких супроводжується зміною геометрії активної поверхні. Встановлено наявність стійкого детермінованого зв'язку електромагнітних хромосом генетичної програми і ізомерними композиціями зі схемою розміщення індукторних модулів і видом просторового руху технологічного виробу. Достовірність генетичних програм і результатів синтезу підтверджено на прикладі проектного синтезу конкурентоспроможної модульної електромеханічної системи з адаптивною просторовою структурою, у складі роботизованого технологічного маніпулятора, призначеного для оперування сталевими трубами і листовим прокатом. Результати досліджень становлять системну основу для постановки задач інноваційного синтезу нових структурних різновидів електромеханічних систем з просторово адаптивною модульною структурою активних частин.

**Ключові слова:** просторово розподілена електромеханічна система, індукторний модуль, адаптивна активна поверхня, макрогенетична програма, реплікація, мутація, ізомерна композиція.

Анализируется характерная тенденция в развитии современной техники, которая связана с созданием сложных пространственных систем, наделенных возможностью адаптировать пространственную геометрию исполнительного органа в соответствии с изменением факторов внешнего воздействия. Определены принципы генетического структурообразования пространственно распределенных модульных электро-механических систем с адаптивной геометрией активной зоны. Определены макрогенетические программы генетически допустимых базовых Видов электро-механических структур с изменяемой геометрией и ориентацией активных частей. Показана доминирующая роль операторов репликации, мутации и структурной изомерии в задачах синтеза пространственно адаптивных систем модульного типа. Впервые исследованы механизмы межродовых мутаций, которые определяют принципы структурообразования объектов "эластичной электро-механики", функционирование которых сопровождается изменением геометрии активной поверхности. Установлено наличие устойчивой детерминированной связи электромагнитных хромосом генетической программы и изомерных хромосомных композиций, с компоновкой активных индукторных модулей и видом пространственного движения технологического изделия. Достоверность генетических программ и результатов синтеза подтверждена на примере проектного синтеза конкурентоспособной модульной электро-механической системы с адаптивной пространственной структурой, в составе роботизированного технологического комплекса, предназначенного для оперирования стальными трубами и листовым прокатом. Результаты исследований представляют системную основу для постановки задач инновационного синтеза новых структурных разновидностей электро-механических систем с пространственно адаптивной модульной структурой активных частей.

**Ключевые слова:** пространственно распределенная электро-механическая система, индукторный модуль, адаптивная активная поверхность, макрогенетическая программа, репликация, мутация, изомерная композиция.

The salient trends of the development of modern technology, which is associated with the creation of complex spatial systems with the ability to adapt the spatial geometry of the working unit in accordance with changes in external factors are analyzed. The principles of genetic structure formation of spatially distributed modular electromechanical systems with adaptive active surface geometry are determined. The macrogenetic programs of genetically permissible basic Species of electromechanical structures with variable geometry and orientation of the active surface are determined. The dominant role of replication, mutation, and structural isomerism operators in the synthesis of spatially adaptive systems of a modular type are shown. The mechanisms of intergeneric mutations were first investigated, which determine the principles of structure formation of the objects of "elastic electromechanics", the functioning of which is accompanied by a change of the geometry of the active surface. The presence of a stable deterministic relationship between the electromagnetic chromosomes of the genetic program and isomeric chromosome compositions, with the layout of the active inductor modules and the type of spatial movement of the technological product were identified. The reliability of genetic programs and synthesis results is confirmed by the example of project synthesis of a competitive modular electromechanical system with an adaptive spatial structure, consisting of a robotic technological complex designed to operate steel pipes and sheet metal. The research results provide a systematic basis for the formulation of problems of innovative synthesis of new structural varieties of electromechanical systems with spatially adaptive modular structure of the active surface.

**Keywords:** spatially distributed electromechanical system, inductor module, adaptive active surface, macrogenetic program, replication, mutation, isomeric composition.

**Вступ. Аналіз стану досліджень.** Одна з характерних тенденцій в еволюції сучасної техніки пов'язана зі створенням складних просторово розподілених систем, наділених можливістю змінювати просторову геометрію виконавчого органу у відповідність зі зміною факторів зовнішнього впливу. Функціонування таких систем максимально наближено до систем природного типу, а їх поява є неминучим результатом технічної еволюції генетично організованих систем, розвиток яких здійснюється за принципом «від простого – до складного». Характерними ознаками систем такого типу є просторово розподілена стру-

ктурна реалізація на основі уніфікованих модулів, просторова адаптація структури і геометрії робочого органу, багатофункціональність і гнучкість керування. Такі системи можуть суміщувати адаптивні функції виконавчих органів, елементи локальної самоорганізації і підсистеми штучного інтелекту. Просторово адаптивні системи вже використовуються в сучасній авіації, космічній і військовій техніці, електроніці, автомобілебудуванні, робототехніці, верстатобудуванні та інших високотехнологічних галузях [1 - 4].

Аналіз функціонально-технічної еволюції електромеханічних перетворювачів енергії (ЕМПЕ), свід-

чить, що на даний час існує велика різноманітність електричних машин і електромеханічних пристроїв, функціонування яких безпосередньо пов'язано зі змінною структурою і геометрією їх активної зони як у просторі, так і в часі. Поява інтелектуальних матеріалів, застосування нових полімерних композитів і нанотехнологій, відкривають нові можливості синтезу і на прями практичного використання електромеханічних об'єктів (ЕМ-об'єктів) з адаптивною активною зоною. Огляд літератури показує, що системний аналіз структурної організації і технічної еволюції таких ЕМПЕ практично відсутній, і, на даний час, обмежується описом лише їх окремих технічних реалізацій.

**Постановка задачі і мета дослідження.** В концепції структурно-системного підходу просторово адаптовані системи належать до класу генетично визначених, структурна різноманітність і генетична мінливість яких обмежується відповідними генетичними програмами, а їх розвиток характеризується власною функціональною еволюцією [5-8]. Генетична концепція аналізу і системного проектування складних систем ґрунтується на можливості визначенні генетично допустимої різноманітності структурних варіантів, які задовольняють вимогам функції пошуку. Зазначена можливість забезпечується аналізом генетичних програм, які містять систематизовану генетичну інформацію як стосовно відомих структурних аналогів, так і потенційно можливих, але ще невідомих на даний час технічної еволюції досліджуваного класу об'єктів, серед яких буде мати місце і шуканий варіант структури.

В просторово розподілених електромеханічних системах (ЕМ-системах) суттєвого значення, як з точки зору функціонування системи, так і з точки зору її аналізу і синтезу, набувають відношення місцеположення, а також кількості і просторової геометрії їх активних модулів (або груп модулів). Тому об'єктом дослідження є ЕМ-системи з просторово розподіленою структурою індукторних модулів, робочі режими якої супроводжуються зміною просторової орієнтації і геометрії їх активних частин. Метою роботи є визначення макрогенетичних програм і інноваційний синтез модульної ЕМ-системи з просторовою адаптацією просторової структури і геометрії активної поверхні.

**Принципи структуроутворення.** В генетично організованих ЕМ-системах просторова геометрія належить до ключових категорій, які визначають принципи структурної організації об'єктів і систем більш високого рівня складності. В структурі універсального генетичного коду геометрія активної поверхні кодується першою складовою генетичної інформації. Тому геометрія активної зони визначає принципи структуроутворення і системні властивості електромеханічних структур (ЕМ-структур) на всіх рівнях їх організації, починаючи з рівня електромагнітних хромосом, і закінчуючи складними електромагнітними структурами, які створюються в процесі еволюції.

В загальному випадку, зміна просторової геометрії активної зони в режимах функціонування ЕМПЕ може здійснюватися наступними способами:

- зміною структури і просторової геометрії вторинної частини (технологічного середовища);
- зміною відносного положення і просторової орієнтації активних частин;
- просторово-пружною деформацією первинної активної поверхні;
- зміною співвідношення  $\delta/\tau$ ;
- зміною електромагнітної структури в просторово розподілених електромеханічних системах.

Зміна параметрів і просторової геометрії з боку вторинного середовища є необхідною умовою функціонування переважної більшості ЕМПЕ для безпосереднього здійснення технологічних процесів (магнітних і електродинамічних сепараторів, електромеханічних дезінтеграторів, перетворювачів магнітогідродинамічного типу та ін.), тому їх аналіз становить окрему самостійну задачу. В даному дослідженні розглядаються лише просторово розподілені системи зі змінною просторовою орієнтацією і геометрією первинної активної частини.

В теорії генетичного синтезу електромагнітної структури зі змінною просторовою геометрією або порушенням електромагнітної симетрії активних частин належать до класу генетично мутованих [9]. Мутація – один з фундаментальних загальносистемних принципів генетичного структуроутворення, математичну основу яких становить група гомеоморфних перетворень. Топологічним еквівалентом мутаційних перетворень в ЕМ-структурах являються об'ємні або поверхневі деформації активних частин, порушення геометричних пропорцій, або просторової орієнтації їх взаємного положення. Прикладами генетично мутованих об'єктів є активні поверхні зі скосом пазів, функціональні класи електричних двигунів з ротором, що котиться, електричні машини з поворотним статором, ЕМПЕ для безпосереднього здійснення технологічних процесів зі змінною геометрією і структурою активної поверхні тощо.

Генетичний оператор мутації  $M$  змінює генетичну інформацію довільної структури, породжуючи послідовність топологічно еквівалентних структур в межах заданого топологічного простору  $RT$ :

$$M(S) \leftrightarrow (S_{M1}, S_{M2}, \dots, S_{Mn}) \subset R^T. \quad (1)$$

В прикладних задачах генетичного синтезу, оператору  $M$  ставиться у відповідність група взаємно однозначних і неперервних просторових деформацій – стиснення, розтягу, зсуву, вигину, кручення та ін. В процедурах синтезу багатоеlementних ЕМ-структур оператор мутації утворює стійку комбінацію з оператором реплікації і ізомерними композиціями, структурними еквівалентами яких є просторово розподілені системи модульного типу [10].

**Макрогенетичні програми.** Макрогенетичні програми довільних функціональних класів ЕМ-систем визначаються методами генетичного аналізу в межах предметної області системної моделі, функцію якої виконує генетична класифікація (ГК) первинних джерел електромагнітного поля [6-8]. Для досліджуваного класу ЕМ-об'єктів, які допускають зміну просторової орієнтації активних частин, інтегральна функ-

ція пошуку  $F_{OZ}$  визначається сукупністю наступних часткових вимог: реалізація відносного  $OZ$ -повороту ( $\beta = 0 \div \pi$ ) активних частин (рис. 1); незмінність повітряного зазору ( $\delta \approx const$ ); забезпечення максимальної площі перекриття активної зони ( $S_a = max$ ):

$$F_{OZ} = \{(\beta = 0 \div \pi), (\delta \approx const), (S_a = max)\}. \quad (2)$$

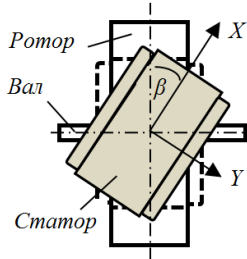


Рис. 1 – Модель електричної машини з  $OZ$ -поворотним індуктором

В межах першого великого періоду ГК, заданій інтегральній функції задовольняють електромагнітні хромосоми трьох Родів: сферичних (СФ), плоских (ПЛ) і тороїдальних плоских (ТП) первинних джерел електромагнітного поля. Результати генетичного аналізу показують, що найбільшою схильністю до поворотної симетрії  $OZ$ -типу наділені електромагнітні хромосоми Роду сферичних і Роду плоских:

$$Q_{СФ} = (СФ0.0y; СФ0.0x; СФ0.2y; СФ2.0x; СФ2.2y; СФ2.2x), \quad (3)$$

$$Q_{ПЛ} = (ПЛ0.0y; ПЛ0.0x; ПЛ0.2y; ПЛ2.0x; ПЛ2.2y; ПЛ2.2x), \quad (4)$$

а також дві хромосоми Роду тороїдальних плоских:

$$Q_{ТП} = (ТП2.2y; ТП2.2x). \quad (5)$$

Просторовий  $OZ$ -поворот допускають також гібридні, генетично мутовані хромосоми внутрішньовидового рівня:

$$Q_H = \{(ПЛ2.2x,y)_1 \times (ЦЛ)_2; (ПЛ2.2x,y)_1 \times (ТП)_2; (ПЛ2.2x,y)_1 \times (СФ)_2; (ТП2.2x,y)_1 \times (ПЛ)_2\}. \quad (6)$$

Кінцева множина електромагнітних хромосом (3-6) узагальнюються поняттям макрогенетичної програми структуроутворення функціонального класу ЕМ-об'єктів з  $OZ$ -поворотними активними частинами. Інваріантна частина генетичної інформації довільного первинного джерела поля в структурі ГК встановлює детермінований інформаційний зв'язок з відповідним Видом ЕМ-об'єктів. Тому кінцева множина електромагнітних хромосом макрогенетичної програми однозначно визначає різноманітність Видів ЕМПЕ, в структурній еволюції яких, рано чи пізно, появляться ЕМ-об'єкти – нащадки зі змінною геометрією активних частин. Програма містить генетичну інформацію стосовно 18 генетично допустимих Видів ЕМ-структур з  $OZ$ -поворотною симетрією, серед яких: 12 Видів визначають структурну різноманітність об'єктів обертального руху і 6 базових Видів встановлюють межі структуроутворення машин поступального руху.

За критерієм максимальної адаптації до зміни просторової геометрії активної поверхні ЕМ-об'єктів

найбільш високим рівнем генетичної схильності наділені електромагнітні хромосоми групи 2.2. В межах першого великого періоду ГК генетична інформація джерел групи 2.2 представлена двома горизонтальними гомологічними рядами

$$T_{22y} = (CL\ 2.2y; KN\ 2.2y; PL\ 2.2y; TP\ 2.2y; SF\ 2.2y; TC\ 2.2y), \quad (7)$$

$$T_{22x} = (CL\ 2.2x; KN\ 2.2x; PL\ 2.2x; TP\ 2.2x; SF\ 2.2x; TC\ 2.2x). \quad (8)$$

Для електричних машин з твердотільними вторинними частинами, що реалізують обертальний, або поступальний просторовий рух, область існування породжувальних структур обмежується хромосомним набором підгрупи  $T_{22y}$  (7). Як відомо, зміна просторової геометрії гомологічних електромагнітних хромосом пов'язана відношенням гомеоморфізму:

$$H_{22y} = (\dots \leftrightarrow CL \leftrightarrow KN \leftrightarrow PL \leftrightarrow TP \leftrightarrow \leftrightarrow SF \leftrightarrow TC \leftrightarrow \dots)_{2.2y} \subset R_3. \quad (9)$$

В алгоритмах синтезу гомеоморфізм хромосом (9) реалізується процедурами міжродових хромосомних мутацій, що призводить до зміни родової геометрії відповідної хромосоми в межах заданого топологічного простору. Генетично допустима множина міжродових хромосомних мутацій теоретично визначається комбінаторним простором хромосом ряду (7), а практично обмежується їх можливістю технічної реалізації структур-нащадків. Найбільшу практичну цінність будуть мати парні хромосомні мутації ( $N_1 = 2$ ), в межах підгрупи 2.2y, генетична схильність яких чутлива як до зміни просторової орієнтації активних частин, так і до зміни геометрії активної поверхні. Зазначені хромосомні мутації мають детермінований зв'язок з просторовою геометрією активної поверхні і видом просторового руху об'єктів-нащадків (табл. 1).

Систематизовану інформацію, яку представлено в табл. 1, можна розглядати як системну основу структуроутворення об'єктів «еластичної електромеханіки» підгрупи 2.2y для комбінаторного простору  $N_1 = 2$ .

**Генетичний синтез.** Задачу синтезу просторово адаптивної ЕМ-структури розглянемо на прикладі створення тягової ЕМ-системи роботизованого технологічного комплексу для обробки сталевих труб великого діаметру. Вихідною інформацією для синтезу генетичної моделі є сукупність вимог до шуканої структури ЕМ-системи і результати аналізу її макрогенетичної програми.

Інтегральна функція синтезу  $F_S$  має задовольняти наступній сукупності часткових вимог:

- 1) Можливість функціонування зі сталевими виробами як циліндричної, так і плоскої просторової форми ( $G_{2CL}$ ,  $G_{2PL}$ ), які одночасно виконують функцію вторинної частини ЕМ-системи;
- 2) Реалізація поступального, обертального і складного просторового руху технологічного об'єкта ( $\omega$ ,  $V$ );
- 3) Модульне виконання індукторів ( $N_1 > 2$ );
- 4) Можливість зміни просторової орієнтації елементарного індукторного модуля відносно поверхні технологічного об'єкта ( $\beta_{OZ} \rightarrow var$ );

Таблиця 1 – Взаємозв'язок міжродових хромосомних мутацій з геометрією активної поверхні і видом просторового руху ЕМ-об'єктів-нащадків (підгрупа  $T_{22y}$ )

Міжродова хромосомна мутація	Вид просторової деформації	Структурна формула мутованої хромосоми	Вид просторового руху
$PL \leftrightarrow CL$	$M_{OY}$	$2.2y(PL \leftrightarrow CL)_1$	Поступальний ( $V_{OX}$ ) $\leftrightarrow$ обертальний ( $\omega_{OY}$ )
$PL \leftrightarrow TP$	$M_{OZ}$	$2.2y(PL \leftrightarrow TP)_1$	Поступальний ( $V_{OX}$ ) $\leftrightarrow$ обертальний ( $\omega_{OZ}$ )
$PL \leftrightarrow SF$	$(M_{OY} \leftrightarrow M_{OX})_R$	$2.2y(PL \leftrightarrow SF)_1$	Поступальний ( $V_{OX}$ ) $\leftrightarrow$ обертальний ( $\omega_{OY}$ )
$CL \leftrightarrow SF$	$M_{OX}$	$2.2y(CL \leftrightarrow SF)_1$	Обертальний ( $\omega_{OY}$ )
$PL \leftrightarrow KN$	$M_{OZ} \leftrightarrow M_{OY}$	$2.2y(PL \leftrightarrow KN)_1$	Поступальний ( $V_{OX}$ ) $\leftrightarrow$ обертальний ( $\omega_{OY}$ )
$TP \leftrightarrow KN$	$M_{OY}$	$2.2y(TP \leftrightarrow KN)_1$	Обертальний ( $\omega_{OZ}$ ) $\leftrightarrow$ ( $\omega_{OY}$ )
$CL \leftrightarrow KN$	$M_{OZ}$	$2.2y(CL \leftrightarrow KN)_1$	Обертальний ( $\omega_{OY}$ )
$KN \leftrightarrow SF$	$(M_{OX} \leftrightarrow M_{OY})_R$	$2.2y(KN \leftrightarrow SF)_1$	Обертальний ( $\omega_{OY}$ )
$TP \leftrightarrow SF$	$(M_{OX} \leftrightarrow M_{OY})_R$	$2.2y(TP \leftrightarrow SF)_1$	Обертальний ( $\omega_{OZ}$ ) $\leftrightarrow$ ( $\omega_{OY}$ )
$CL \leftrightarrow TP$	$M_{OY} \leftrightarrow M_{OZ}$	$2.2y(CL \leftrightarrow TP)_1$	Обертальний ( $\omega_{OY}$ ) $\leftrightarrow$ ( $\omega_{OZ}$ )
$CL \leftrightarrow TC$	$[M_{OY} \leftrightarrow (M_{OX})_{R1} \leftrightarrow (M_{OZ})_{R2}]$ , де $(R_2 > R_1)$	$2.2y(CL \leftrightarrow TC)_1$	Обертальний ( $\omega_{OY}$ ) $\leftrightarrow$ ( $\omega_{OZ}$ )
$PL \leftrightarrow TC$	$[(M_{OX})_{R1} \leftrightarrow (M_{OZ})_{R2}]$ , де $(R_2 > R_1)$	$2.2y(PL \leftrightarrow TC)_1$	Поступальний ( $V_{OX}$ ) $\leftrightarrow$ обертальний ( $\omega_{OZ}$ )
$KN \leftrightarrow TC$	$[(M_{OZ})_{R2} \leftrightarrow (M_{OX})_{R1}]$ , де $(R_2 > R_1)$	$2.2y(KN \leftrightarrow TC)_1$	Обертальний ( $\omega_{OY}$ ) $\leftrightarrow$ ( $\omega_{OZ}$ )
$SF \leftrightarrow TC$	$[(M_{OX})_{R1} \leftrightarrow (M_{OZ})_{R2}]$ , де $(R_2 > R_1)$	$2.2y(SF \leftrightarrow TC)_1$	Обертальний ( $\omega_{OY}$ ) $\leftrightarrow$ ( $\omega_{OZ}$ )

5) Можливість зміни просторової геометрії активної поверхні індукторного модуля під дією сил магнітного тяжіння ( $G_A \rightarrow \text{var}$ );

6) Забезпечення незмінності повітряного зазору ( $\delta_{OZ} \rightarrow \text{const}$ );

7) Можливість оперативної зміни просторової схеми розміщення і кількості активних індукторних модулів в структурі технологічного маніпулятора ( $N_I \rightarrow \text{var}$ ).

З врахуванням зазначених часткових вимог, вектор інтегральної функції синтезу в пошуковому просторі  $R^n$  набуває вигляду:

$$F_S = [(G_{2CL}, G_{2PL}); (\omega, V); (N_I > 2); (\beta_{OZ} \rightarrow \text{var}); (G_A \rightarrow \text{var}); (\delta_{OZ} \rightarrow \text{const}); (N_I \rightarrow \text{var})] \subset R_n. \quad (10)$$

Заданій функції пошуку (6) ставиться у відповідність багаторівнева генетична модель дивергентного типу (рис. 2).

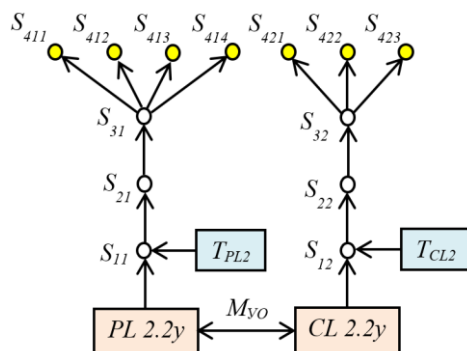


Рис. 2 – Генетична модель просторово розподіленої модульної ЕМ-системи з адаптивною геометрією активної зони

Структура моделі містить п'ять рівнів генетичної складності, які представлено: батьківською електромагнітною хромосомою  $PL2.2y$  домінуючого Виду

ЕМ-структур (нульовий рівень); паралельними послідовностями генетично модифікованих електромагнітних хромосом інформаційного типу ( $S_{11}-S_{32}$ ), які визначають траєкторію синтезу шуканої ЕМ-структури (рівні 2-4), і ізомерними просторовими композиціями породжувальних електромагнітних хромосом ( $S_{411}-S_{414}; S_{421}-S_{423}$ ), які задовольняють заданій функції синтезу і моделюють просторово розподілену структуру модульної ЕМ-системи (рівень 5).

Характерна особливість генетичної моделі (рис. 2) визначається гомеоморфізмом батьківських хромосом  $PL2.2y$  і  $CL2.2y$ , які через оператор міжродової мутації ( $M_{YOZ}$ ) можуть одночасно існувати в двох геометричних формах активної поверхні

$$M_{YOZ} [2.2y (PL \leftrightarrow CL)_{ZOx}]_1 \subset T_{22y}. \quad (11)$$

Ще один вид мутації представлено хромосомами  $S_{21}$  і  $S_{22}$ , які моделюють їх здатність до реалізації відносного  $OZ$ -повороту активних частин. Зазначені хромосомні мутації визначають процедуру синтезу ЕМ-структури, яка здатна по чергово реалізувати функцію плоского індуктора поступального руху, або дугового циліндричного індуктора обертального руху в залежності від типу вторинної хромосоми, яка моделює просторову геометрію технологічного об'єкта. Варіанти просторової геометрії активної поверхні технологічного об'єкта (вимога 1), в моделі представлено вторинними транзитними хромосомами  $T_{PL2}$  і  $T_{CL2}$ . Результати розшифрування мікрогенетичної програми наведено в табл. 2.

Результати аналізу мікрогенетичної програми (табл. 2) підтверджують домінуючу роль операторів мутації ( $M_i$ ) і реплікації ( $R_i$ ) в процедурах формування ізомерних композицій, які визначають генетичну природу структуроутворення модульних ЕМ-об'єктів зі змінною структурою і геометрією активної зони.

Таблиця 2 – Результати розшифрування мікрогенетичної програми структуроутворення модульної ЕМ-системи зі змінною просторовою структурою і геометрією активної зони

Номер хромосоми	Структурна формула синтезованої хромосоми	Статус хромосоми
PL2.2y	PL 2.2y	Батьківська
	$[(PL2.2y):M_{ZOY}]_1 \rightarrow (CL2.2y)_1$	Батьківська, міжродовий мутант
S <sub>11</sub>	$(PL2.2y)_1 \times (T_{PL})_2$	Електромагнітна парна, інформаційна
S <sub>21</sub>	$[(PL2.2y):M]_1 \times (T_{PL})_2$	Мутована, інформаційна
S <sub>31</sub>	$[(PL2.2y):M:R]_1 \times (T_{PL})_2$	Реплікована, інформаційна
S <sub>411</sub>	$[(PL2.2y):M:R_{XOY}:V_{OX}]_1 \times (T_{PL})_2$	Ізомер (OX-орієнтована), породжувальна
S <sub>412</sub>	$[(PL2.2y):M:R_{XOY}:V_{OY}]_1 \times (T_{PL})_2$	Ізомер (OY-орієнтована), породжувальна
S <sub>412</sub>	$[(PL2.2y):M:R_{XOY}:\omega_{OZ}]_1 \times (T_{PL})_2$	Ізомер (OZ-поворотна), породжувальна
S <sub>413</sub>	$[(PL2.2y):M:R_{XOY}:V_{OX}:V_{OY}:\omega_{OZ}]_1 \times (T_{PL})_2$	Ізомер (V, $\omega$ ) <sub>XOY</sub> , породжувальна
S <sub>12</sub>	$(CL2.2y)_1 \times (T_{CL})_2$	Електромагнітна парна, інформаційна
S <sub>22</sub>	$[(CL2.2y):M]_1 \times (T_{CL})_2$	Мутована, інформаційна
S <sub>32</sub>	$[(CL2.2y):M:R]_1 \times (T_{CL})_2$	Реплікована, інформаційна
S <sub>421</sub>	$[(PL2.2y):M:R_{ZOY}:V_{OX}]_1 \times (T_{CL})_2$	Ізомер (OX-орієнтована), породжувальна
S <sub>422</sub>	$[(CL2.2y):M:R_{ZOY}:\omega_{OX}]_1 \times (T_{CL})_2$	Ізомер (OX-поворотна), породжувальна
S <sub>423</sub>	$[(PL2.2y):M:R_{ZOY}:V_{OX}] \leftrightarrow (CL2.2y):M:R_{ZOY}:\omega_{OX}]_1 \times (T_{CL})_2$	Ізомер (V, $\omega$ ) <sub>OX</sub> , породжувальна

**Аналіз синтезованих просторових ізомерних композицій.** За результатами генетичного моделювання отримано структурні формули ізомерних хромосомних композицій S<sub>411</sub>-S<sub>414</sub> (для функціонування з плоскими об'єктами) і S<sub>421</sub>-S<sub>423</sub> (для функціонування з циліндричними об'єктами) зі статусом породжувальних, які задовольняють заданій функції синтезу F<sub>S</sub>. Кожній з зазначених ізомерних композицій ставиться у відповідність конкретний структурний еквівалент просторового розташування і орієнтації індукторних модулів.

Результати генетичного моделювання встановлюють взаємозв'язок між генетичними операторами синтезу і ізомерними композиціями електромагнітних хромосом, з одного боку, та схемою компоновки індукторних модулів і видом просторового руху – з іншого. Структурна ізомерія – системна властивість генетично організованих систем довільної фізичної природи з багатоеlementною (N ≥ 2) структурою, утворювати N<sub>i</sub> варіантів просторових композицій [9]. Явище ізомерії первинних джерел електромагнітного поля вперше відкрито і описано при аналізі інваріантних властивостей системної моделі – ГК первинних джерел електромагнітного поля [5, 11]. Синтезовані ізомерні композиції дозволяють визначити просторові компоновальні схеми індукторних модулів і відповідні види просторового руху технологічного об'єкта в залежності від його типу і просторової геометрії (табл. 3).

Систематизовані варіанти просторових компонок індукторних модулів і відповідних видів просторового руху технологічного об'єкта (табл. 3) виконують функцію генетичного каталогу для вибору режимів функціонування просторово розподіленої ЕМ-системи технологічного маніпулятора. Результати аналізу також становлять вихідну інформацію для розробки алгоритмів автоматизованого керування технологічними процесами.

**Практична реалізація.** Результати синтезу покладено в основу розробки проекту роботизованого

технологічного комплексу для оперування просторовим положенням сталевих труб великого діаметра (рис. 3, а) і листового прокату (рис. 3, б). Можливість зміни просторової орієнтації індукторних модулів відносно поверхні об'єкта оперування, та їх здатність змінювати геометрію активної поверхні, дозволяє оперувати технологічними об'єктами з різною просторовою геометрією і реалізувати задані види просторого руху з використанням однотипних уніфікованих тягових модулів.

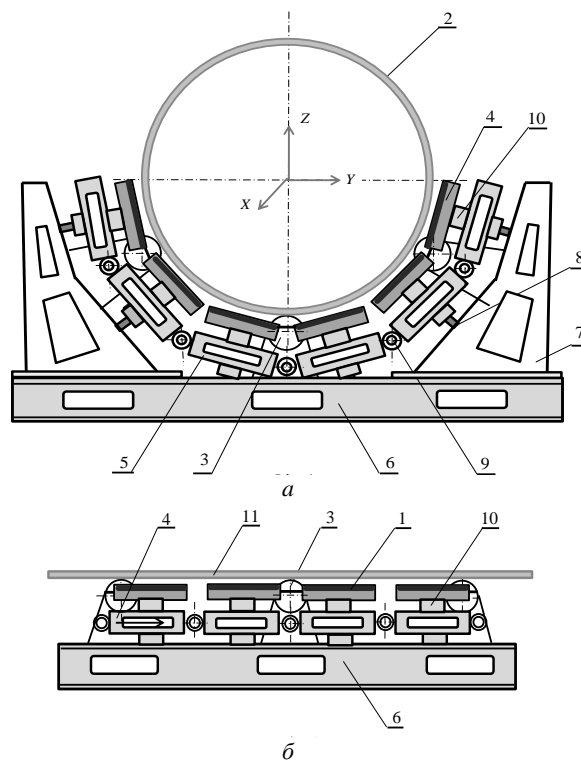
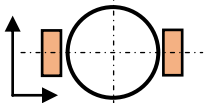
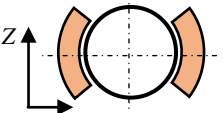
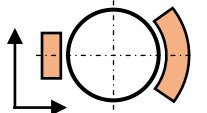
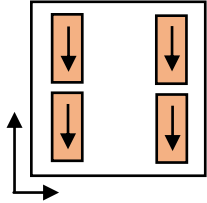
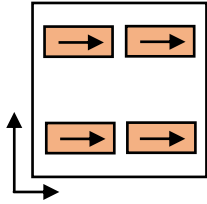
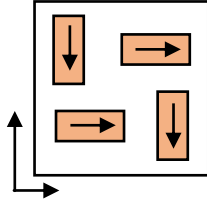
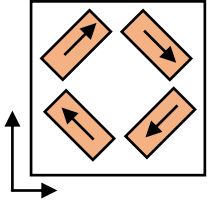


Рис. 3 – Багатофункціональна електромеханічна система з просторовою адаптацією індукторних модулів для технологічного маніпулятора сталевими трубами (а) і листовим прокатом (б)

Таблиця 3 – Взаємозв'язок генетичної інформації ізомерних композицій з просторовою компоновкою активних індукторних модулів та видом просторового руху технологічного об'єкта

Вид просторового руху	Структурна формула ізомерної композиції	Компоновка індукторних модулів*
<b>Технологічний об'єкт – сталеві труба</b>		
Поступальний: $\pm (V_{Ox});$	$4(PL2.2x)_{xOy}$	
Обертальний: $\pm (\omega_{Ox});$	$4[(CL2.2y):M_{Oz}(\pi/4):M_{Zoy}]_{zOy}$	
Обертально-поступальний (гвинтовий): $\pm (V_{Ox} \times \omega_{Ox});$	$2(PL2.2x)_{xOy} \times 2[(CL2.2y):M_{Oz}(\pi/4)]_{zOy}$	
<b>Технологічний об'єкт – сталевий листовий прокат</b>		
Поступальний: $\pm (V_{Ox});$	$4(PL2.2x)_{Ox}$	
Поступальний: $\pm (V_{Oy});$	$4[(PL2.2y):M_{Oz}(\pi/4)]_{Oy}$	
Плоско-паралельний: $\pm (V_{Ox} \times V_{Oy});$	$2(PL2.2x)_{Ox} \times 2[(PL2.2y):M_{Oz}(\pi/4)]_{Oy}$	
Обертальний: $\pm (\omega_{Oz});$	$(PL2.2y):M_{Oz}[(-\pi/4) \times (\pi/4) \times (3\pi/4) \times (5\pi/4)]_{xOy}$	

\*Для  $N_I = (2 \times 2)$ 

Одночасно можна здійснювати регулювання швидкості руху об'єкта (шляхом зміни просторової орієнтації індукторних модулів, з використанням частотного, або амплітудно-фазового регулювання), а також реалізувати режими електромагнітного гальмування (наприклад, з використанням режиму динаміч-

ного гальмування). Модульна структура ЕМ-системи також дозволяє оперувати кількістю індукторних модулів, що дозволяє змінювати просторову схему активних модулів і реалізувати енергоощадні режими технологічної обробки об'єктів з різними габаритами і масою.

В даному проекті використано уніфіковані поворотні модулі з адаптивною активною поверхнею, які забезпечують режими функціонування як зі сталевими трубами різного діаметру, так і з сталевим листовим прокатом. Один з можливих варіантів технічної реалізації міжродової хромосомної мутації типу (11) представлено індукторним модулем, наділеним властивістю пружної деформації активної поверхні в площині ZOХ і реалізацією OZ-повороту (рис. 4).

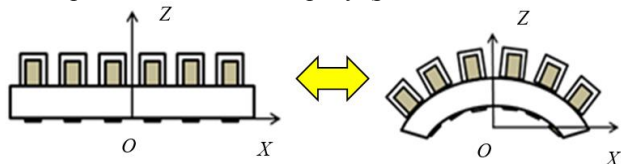


Рис. 4 – Варіант індукторного модуля з адаптивною просторовою геометрією активної поверхні, синтезованого за формулою хромосомної мутації (11)

Індуктор такого типу, виготовлений за технологією еластичної електромеханіки, може функціонувати в двох геометричних формах активної поверхні – плоскій і дуговій, з реалізацією відповідного просторового руху сталевого технологічного об’єкта – поступального, або обертального.

Функція індивідуального OZ-повороту модулів відносно поверхні об’єкта оперування забезпечує необхідні просторові рухи технологічного об’єкта (поступальний, зворотно-поступальний, обертний, гвин-

товий, плоско-паралельний, або складний програмований рух).

Запропоноване технічне рішення, у порівнянні з відомими аналогами, дозволяє:

- забезпечити повну уніфікацію індукторних модулів і основних вузлів маніпулятора, розширити їх функціональні можливості та підвищити надійність ЕМ-системи;

- забезпечити високу адаптивність просторово розподіленої системи індукторних модулів до оперування великогабаритними сталевими об’єктами різної просторової геометрії, габаритів і маси з можливістю повної автоматизації технологічних процесів;

- суттєво розширити функціональні можливості електромеханічної системи (за рахунок функціонування зі змінною просторовою геометрією технологічного об’єкта, кількісного складу, просторової орієнтації та способів керування режимами роботи індукторних модулів);

- реалізувати енергоощадні режими обробки (шляхом використання оптимальної кількості активних модулів, в залежності від габаритних розмірів, геометрії і маси об’єкта маніпулювання).

Технологія модульної ЕМ-системи з просторово адаптивною активною зоною індукторних модулів визначає сучасний інноваційний рівень в еволюції технологічних систем з просторово розподіленими активними частинами (табл. 4).

Таблиця 4 – Генетична еволюція модульного лінійного асинхронного електроприводу в технологічних лініях транспортування і обробки сталевих труб великого діаметра

Час еволюції	1970-1973		1975-1979	2010	2020
Методологія синтезу	Евристична			Системно-генетична	
Компонувальна схема					
Генетичний код	$PL2.2x$	$CL2.2x$	$^2PL2.2x$	$CL2.2(x \times y)$	$(PL \leftrightarrow CL)2.2y$
Просторова геометрія активної зони	$(PL)_1 \times (CL)_2$	$(CL)_1 \times (CL)_2$	$^*(PL)_1 \times (CL)_2$	$(CL)_1 \times (CL)_2$	$(PL \leftrightarrow CL)_1 \times (CL)_2$
Кількість типорозмірів індукторних модулів	1	1	1	2	1
Вид просторового руху технологічного об’єкта	$V_{Ox}$	$V_{Ox}$	$V_{Ox}$	$V_{Ox}; \omega_{Ox}; (V \times \omega)_{Ox};$	$V_{Ox}; V_{Oy}; \omega_{Ox}; \omega_{Oz}; (V \times \omega)_{Ox};$

**Висновки.**

Вперше визначено принципи генетичного структуроутворення просторово розподілених модульних ЕМ-систем з адаптивною геометрією активної зони. Визначено макрогенетичні програми генетично допустимих базових Видів ЕМ-структур зі змін-

ною орієнтацією активних частин (18 Видів) і об’єктів еластичної електромеханіки (12 Підвидів), які допускають зміну просторової геометрії активної поверхні. Показано домінуючу роль операторів реплікації і мутації в задачах синтезу просторово адаптованих систем. Вперше визначено генетичні програми і розроблено алгори-

тми міжродової мутації, які визначають принципи структуроутворення модульних об'єктів еластичної електромеханіки, функціонування яких здійснюється зі змінною геометрією активної поверхні. Встановлено наявність детермінованого зв'язку між елементним базисом періодичної системи первинних джерел електромагнітного поля (генетичною програмою), ізомерними хромосомними композиціями і просторовою компоновкою активних індукторних модулів та видом просторового руху технологічного об'єкта. Достовірність генетичних програм і синтезованих структур підтверджено на прикладі розробки проекту конкурентоспроможної модульної ЕМ-системи з адаптивною просторовою структурою, у складі роботизованого технологічного комплексу, призначеного для обробки сталевих труб і прокату.

Результати досліджень становлять основу для постановки задач інноваційного синтезу нових структурних різновидів модульних ЕМ-систем з адаптивною просторовою структурою активних елементів і використанням інноваційної технології еластичної електромеханіки.

#### Список літератури

1. Knaian A. N. The Milli-Motein: A self-folding chain of programmable matter with a one centimeter module pitch / A. N. Knaian, K. C. Cheung, M. B. Lobovsky, A. J. Oines, P. Schmidt-Neilsen and N. A. Gershenfeld // 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 7-12 Oct. 2012. – Vilamoura, Portugal, 2012. – Pp. 1447-1453.
2. doi: 10.1109/IROS.2012.6385904. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6385904&isnumber=6385431>.
3. Shikhirin Valeriy. Elastic machines and mechanisms of the future / Valeriy Shikhirin // The Summary of Technologies. – 2001. – № 2(6). – Pp. 37-42.
4. Available at: <http://www.alt-tech.org/files/fizika/shikhirin2.pdf>.
5. Cheng I-Chun. Overview of Flexible Electronics Technology / I-Chun Cheng and Sigurd Wagner // Flexible Electronics: Materials and Applications. – Springer Science+Business Media, LLC, New York, USA. – 2009. – Pp. 1-28.
6. doi: 10.1007/978-0-387-74363-9\_1.
7. Кузнецов Ю. Н. Морфологический синтез станков и их механизмов: Монография / Ю. Н. Кузнецов, Герра Ж. А. Хамуйела, Т. О. Хамуйела. – К.: ООО "Гнозис", 2012. – 416 с.
8. Шинкаренко В. Ф. Основи теорії еволюції електромеханічних систем / В. Ф. Шинкаренко. – К.: Наукова думка, 2002. – 288 с.
9. Шинкаренко В. Ф. Генетические программы структурной эволюции антропогенных систем. (Междисциплинарный аспект) / В. Ф. Шинкаренко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2013. – Вип. 13, том 4. – С. 11-20. – Режим доступу: [http://nauka.tsatu.edu.ua/print-journals-tdata/13-4/13\\_4/2.pdf](http://nauka.tsatu.edu.ua/print-journals-tdata/13-4/13_4/2.pdf).
10. Shinkarenko V. Genetic Programs of Complex Evolutionary Systems (Part 1) / V. Shinkarenko, Y. Kuznetsov // 11th Anniversary International Scientific Conference "Unitech'11", 18-19 November 2011. – Gabrovo, Bulgaria, 2011. – Vol. I. – Pp. 33-43.
11. Shynkarenko V. Genetic Programs of Structural Evolution of Hybrid Electromechanical Objects / V. Shynkarenko, Iu. Gaidaienko, Ahmad N. Al-Husban // International Journal of Engineering & Technology. 2013. – Vol. 2, No. 1. – Pp. 44-49.
12. Шинкаренко В. Ф. Словник з структурної і генетичної електромеханіки / В. Ф. Шинкаренко, А. А. Шиманська. – К.: НТУУ "КПІ", 2015. – 112 с.
13. Shynkarenko V. Modular Principle in the Structural organization and Evolution of Electromechanical Objects / V. Shynkarenko, A. Makki, V. Kotliarova and A. Shymanska // 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). – Kremenchuk, Ukraine, 2019. – Pp. 162-165.
14. doi: 10.1109/MEES.2019.8896446. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8896446&isnumber=8896362>.
15. Шинкаренко В. Ф. Структурная изомерия и ее моделирование в задачах генетического синтеза электромеханических структур / В. Ф. Шинкаренко, А. А. Августинович, В. В. Лысак, М. А. Вахновецкая // Электротехника и электромеханика, 2009. – № 1. – С. 33-36. – Режим доступу: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/143169>

#### References (transliterated)

1. Knaian A. N., Cheung K. C., Lobovsky M. B., Oines A. J., Schmidt-Neilsen P. and Gershenfeld N. A. The Milli-Motein: A self-folding chain of programmable matter with a one centimeter module pitch. 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 7-12 Oct. 2012, Vilamoura, Portugal, 2012, pp. 1447-1453.
2. doi: 10.1109/IROS.2012.6385904. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6385904&isnumber=6385431>
3. Shikhirin Valeriy. Elastic machines and mechanisms of the future. *The Summary of Technologies*, 2001, no 2(6), pp. 37-42.
4. Available at: <http://www.alt-tech.org/files/fizika/shikhirin2.pdf>.
5. Cheng I-Chun and Wagner Sigurd. Overview of Flexible Electronics Technology. *Flexible Electronics: Materials and Applications*, Springer Science+Business Media, LLC, New York, USA, 2009, pp. 1-28.
6. doi: 10.1007/978-0-387-74363-9\_1
7. Kuznetsov Y. N., Hamuyela Guerra J. A., Hamuyela T. O. *Morfologicheskii sintez stankov i ikh mekhanizmov: Monografiya* [Morphological synthesis tools and mechanisms: Monograph]. Kiev, Ltd "Gnosis", 2012, 416 p.
8. Shynkarenko V. F. *Osnovy teoriiy evolyutsiyi elektromekhanichnykh sistem* [Fundamentals of the Theory of Evolution of Electromechanical Systems]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 2002, 288 p.
9. Shynkarenko V. F. *Geneticheskie programmy strukturnoy evolyutsii antropogennykh sistem. (Mezhdistylinarnyy aspekt)* [Genetic Programs of the Structural Evolution of Anthropogenic Systems. (Interdisciplinary aspect)]. *Pratsi Tavriys'koho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu* [Proceedings of the Tavria State Agrotechnological University], 2013, iss. 13, vol. 4, pp. 11-20. Available at: [http://nauka.tsatu.edu.ua/print-journals-tdata/13-4/13\\_4/2.pdf](http://nauka.tsatu.edu.ua/print-journals-tdata/13-4/13_4/2.pdf)
10. Shinkarenko V., Kuznetsov Y. Genetic Programs of Complex Evolutionary Systems (Part 1). 11th Anniversary International scientific Conference "Unitech'11", 18-19 November 2011, Gabrovo, Bulgaria, 2011, vol. I, pp. 33-43.
11. Shynkarenko V., Gaidaienko Iu., Al-Husban Ahmad N. Genetic Programs of Structural Evolution of Hybrid Electromechanical Objects. *International Journal of Engineering & Technology*, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 44-49.
12. Shynkarenko V. F., Shymanska A. A. *Slovnnyk z strukturnoyi i henetychnoyi elektromekhaniky* [Dictionary of the structural and genetic electromechanics]. Kyiv: NTUU "KPI", 2015, 112 p.
13. Shynkarenko V., Makki A., Kotliarova V. and Shymanska A. Modular Principle in the Structural organization and Evolution of Electromechanical Objects. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 2019, pp. 162-165.
14. doi: 10.1109/MEES.2019.8896446. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8896446&isnumber=8896362>
15. Shynkarenko V. F., Avgustynovych A. A., Lysak V. V. *Strukturalnaya izomeriya i ee modelirovanie v zadachakh geneticheskogo sinteza elektromekhanicheskikh struktur* [Structural isomery and its modelling in problems of electromechanical structures genetic synthesis]. *Elektrotekhnika i elektromekhanika* [Electrical engineering & electromechanics], 2009, no. 1, pp. 33-36. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/143169>

Надійшло (received) 31.01.2020



*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

Шинкаренко В. Ф. Принципи структуроутворення просторово адаптивних електромеханічних систем зі змінною структурою і геометрією активної зони / В. Ф. Шинкаренко, В. В. Котлярова, П. О. Красовський, Н. А. Мисан // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 62-70. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.11.

Шинкаренко В. Ф. Принципы структурообразования пространственно адаптивных электромеханических систем с переменной структурой и геометрией активной зоны / В. Ф. Шинкаренко, В. В. Котлярова, П. А. Красовский, Н. А. Мисан // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 62-70. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.11.

Shynkarenko V. Principles of structural construction of spatially adaptive electromechanical systems with variable structure and geometry of the active surface / V. Shynkarenko, V. Kotliarova, P. Krasovskyi, N. Misan // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – 2020. – No. 3 (1357). – P. 62-70. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.11.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Шинкаренко Василь Федорович (Шинкаренко Василий Фёдорович, Shynkarenko VasyI)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри електромеханіки, м. Київ, Україна, тел. (044)204-95-18; ORCID: 0000-0002-5054-823X; e-mail: svf1102@gmail.com.

**Котлярова Вікторія Володимирівна (Котлярова Виктория Владимировна, Kotliarova Viktoriia)** – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», асистент кафедри електромеханіки, м. Київ, Україна, тел. +38(050)995-20-28; ORCID: 0000-0002-4182-4175; e-mail: sharik\_2004@ukr.net.

**Красовський Павло Олексійович (Красовский Павел Алексеевич, Krasovskyi Pavlo)** – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», магістрант кафедри електромеханіки, м. Київ, Україна, тел. +38(095)494-69-33; ORCID: 0000-0002-4757-9879; e-mail: krasovskyipav@gmail.com.

**Мисан Назар Андрійович (Мисан Назар Андреевич, Misan Nazar)** – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», студент кафедри електромеханіки, м. Київ, Україна, тел. +38(098)721-95-87; e-mail: graf7230@gmail.com.